

基于双向Cuk变换器的电动汽车锂电池组均衡研究

唐佳维¹, 吴冬春¹, 朱 飞¹, 顾伟伟¹, 冯彦博²

¹盐城工学院电气工程学院, 江苏 盐城

²河海大学机电工程学院, 江苏 常州

收稿日期: 2023年3月21日; 录用日期: 2023年5月16日; 发布日期: 2023年5月23日

摘 要

现今锂电池是新能源汽车主要动力来源, 但串联的锂电池组在使用过程中因为单体电池的不一致性, 这种问题会导致电池的寿命和安全性降低。针对此问题, 提出了一种将双向Cuk变换器和反激式变换器组合起来的动力电池组分组式均衡方案。本均衡方案分为组内均衡以及组间均衡, 组内均衡是由双向Cuk电路来实现的, 可以使相邻锂电池间快速均衡; 而组间均衡是由单向反激式电路实现的, 可使串联锂电池组给任意电量低的电池模块进行充电均衡。在Matlab/Simulink搭建仿真模型, 通过仿真结果对比可以发现此分组式均衡方案不仅可以实现串联锂电池组的均衡, 而且均衡速度更快, 均衡效率良好。

关键词

Cuk变换器, 反激式变换器, 不一致性, 均衡速度, 分组式均衡

Research on Equalization of Lithium Battery Pack for Electric Vehicle Based on Bidirectional Cuk Converter

Jiawei Tang¹, Dongchun Wu¹, Fei Zhu¹, Weiwei Gu¹, Yanbo Feng²

¹School of Electrical Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng Jiangsu

²College of Mechanical and Electrical Engineering, Hohai University, Changzhou Jiangsu

Received: Mar. 21st, 2023; accepted: May 16th, 2023; published: May 23rd, 2023

Abstract

Nowadays lithium battery is the main power source of new energy vehicles, but the series lithium

文章引用: 唐佳维, 吴冬春, 朱飞, 顾伟伟, 冯彦博. 基于双向 Cuk 变换器的电动汽车锂电池组均衡研究[J]. 建模与仿真, 2023, 12(3): 2411-2420. DOI: 10.12677/mos.2023.123221

battery pack will reduce the life and safety of the battery due to the inconsistency of the single battery during use. To solve this problem, a power battery pack grouping equalization scheme combining bidirectional Cuk converter and flyback converter is proposed. The equalization scheme is divided into intra-group equalization and inter-group equalization. The intra-group equalization is realized by bidirectional Cuk circuit, which can make the rapid equalization between adjacent lithium batteries. The intergroup equalization is realized by one-way flyback circuit, which can make the serial lithium battery pack charge equalization to any battery module with low power. The simulation model was set up in Matlab/Simulink. By comparing the simulation results, it can be found that this grouping equalization scheme can not only realize the equalization of series lithium battery pack, but also achieve faster equalization speed and good equalization efficiency.

Keywords

Cuk Converter, Flyback Converter, Inconsistency, Equilibrium Speed, Grouping Equalization

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

当今社会由于环境恶劣,资源匮乏,有些人便把矛头指向了燃油汽车,于是全球都开始普及新能源汽车。锂电池相对于其他普通电池来说有着很多优点,例如:能量比较高;使用寿命长;额定电压高;自放电率很低;重量轻,等等[1] [2],所以锂电池渐渐地成为了新能源汽车的主要动力来源[3]。为了满足一辆新能源汽车的正常使用,由于单节电池的电压较低,这就需要多节电池串联成一个电池组[4]来给电动车提供能量。由于锂电池在工厂生产过程中的误差以及环境等因素的影响,会使锂电池组在使用过程中会出现不一致的状况[5] [6]。而电池组的不一致性会发生电池的使用寿命下降,能量利用率变低,甚至引发爆炸等现象[7] [8]。所以锂电池组在使用过程中必须引用电池均衡技术。

目前均衡锂电池组的方法有两种:主动均衡和被动均衡[9] [10]。被动均衡是以消耗掉能量较高的电池的能量来实现电池间的均衡,这种方法虽然简单易实现,但是能量损耗太高,不宜使用。主动均衡是把能量高的电池的电量转移到能量低的电池来实现均衡,这种方法能量使用率高,均衡效率高。主动均衡主要包括电容型、电感型、变压器型[11]这三种均衡结构。Cuk 斩波电路由电容和电感形式组成的均衡电路[12],同时具有充电回路和放电回路,均衡时对两节电池可以同时进行充电和放电,均衡效率更高[13],均衡速度更快。反激式变换器[14] [15]可以实现串联锂电池组和单体电池间的转移,均衡效果更好。这里把双向 Cuk 变换器和反激式变换器组合起来使用,能有效解决在锂电池组中只使用 Cuk 均衡时,能量在相邻电池间不断转移会有很多能量损失和只使用变压器则体积庞大,成本太高的问题,大大地缩小的它们本身的缺点。均衡分为两个阶段:组内均衡和组间均衡。组内均衡是由双向 Cuk 电路来实现的,可以使相邻锂电池间快速均衡;而组间均衡是由单向反激式电路实现的,可使串联锂电池组给任意电量低的电池模块进行充电均衡。

2. 均衡电路拓扑结构及其工作原理

2.1. 均衡电路拓扑结构

均衡电路拓扑结构如图 1 所示,本文提出了一种由双向 Cuk 变换器和单向反激式变换器组合起来的

分组式均衡方案。由结构图可以看到， $B_i (i=1,2,\dots,n)$ 为单体电池， n 串联的单体电池构成了一个锂电池组， $M_i (i=1,2,\dots,n)$ 为 MOSFET 开关管， $T_i (i=1,2,\dots,n)$ 为变压器， $C_i (i=1,2,\dots,2n)$ 为滤波电容。

均衡电路分为两个均衡阶段：组内均衡和组间均衡。组内均衡由双向 Cuk 模块组成，组间均衡由反激式变换器和串联的锂电池组构成。模组内的两节相邻的锂电池通过双向 Cuk 电路来快速均衡，组内均衡后通过单向反激式变换器实现组间的均衡。

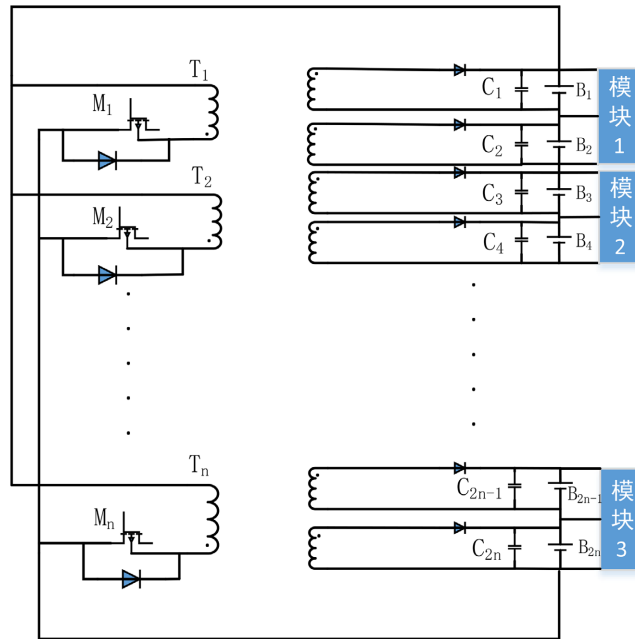


Figure 1. Balanced topology structure
图 1. 均衡拓扑结构

2.2. 均衡电路原理

2.2.1. 组内均衡电路

以图 1 的模块 1 为例来分析组内双向 Cuk 电路的工作原理。每一个模块中因为只有两节电池，所以保证了均衡效率以及均衡速度，减少了电池的能量损耗。

双向 Cuk 均衡电路由电感 L_1 、 L_2 ，耦合电容 C_1 ，MOSFET 开关管 Q_1 、 Q_2 ，续流二极管 D_1 、 D_2 ，锂电池 B_1 、 B_2 组成。双向 Cuk 均衡电路可以实现两节电池能量的双向流动，要实现电池 B_1 的电量向电池 B_2 转移只需要控制开关管 Q_1 ，反之，要实现电池 B_2 的电量向电池 B_1 转移只需要控制开关管 Q_2 。

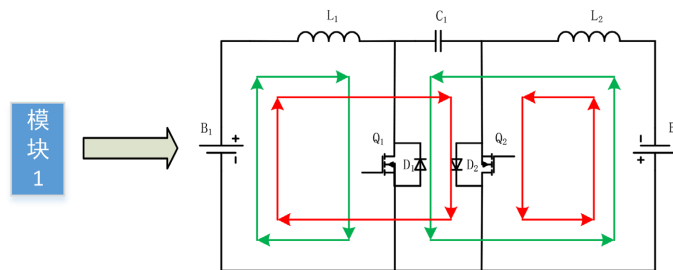


Figure 2. Intra-group equalization circuit
图 2. 组内均衡电路

这里假设 $V_{B1} > V_{B2}$ 。那么开关管 Q_1 和续流二极管 D_2 处于工作状态，通过控制开关管 Q_1 的导通比来控制开关周期，假设开关管的开关周期为 T ，导通占空比 D 为 T_{on}/T 。所以在电池均衡的过程中有两个工作状态，如图 2 所示，绿线回路表示 Q_1 处在导通阶段，则红线回路表示 Q_1 处在关断阶段。

Q_1 导通期间，二极管 D_2 反偏截止，电池 B_1 与电感 L_1 形成回路，电池 B_1 流过电流对电感 L_1 进行储能；电容 C_1 与电池 B_2 、电感 L_2 形成回路，电容 C_1 通过电流对电感 L_2 进行储能，并对电池 B_2 充电。在电池 B_1 给电感 L_1 充电的过程中，流过电感 L_1 的电流 I_{L1} 线性增加，因此得到关系式：

$$L_1 \frac{dI_{L1}}{dt} = V_{B1} \quad (1)$$

可以得到电流 I_{L1} 的增加量为：

$$\Delta I_{L1+} = \frac{V_{B1}}{L_1} DT \quad (2)$$

在电容 C_1 给电感 L_2 、电池 B_2 放电的过程中，此时电感 L_2 上的电流 I_{L2} 线性增加，因此得到关系式：

$$L_2 \frac{dI_{L2}}{dt} = V_{C1} - V_{B2} \quad (3)$$

可以得到电流 I_{L2} 的增加量为：

$$\Delta I_{L2+} = \frac{V_{C1} - V_{B2}}{L_2} DT \quad (4)$$

Q_1 关断期间，二极管 D_2 正向导通，电池 B_1 与电感 L_1 、电容 C_1 形成闭合回路，电感 L_1 对电容 C_1 进行充电；电感 L_2 与电池 B_2 形成闭合回路，电感 L_2 对电池 B_2 进行充电。在电感 L_1 给电容 C_1 充电的过程中，此时电感上的电流 I_{L1} 线性减少，因此得到关系式：

$$L_1 \frac{dI_{L1}}{dt} = V_{B1} - V_{C1} \quad (5)$$

可以得到电流 I_{L1} 的减少量为：

$$\Delta I_{L1-} = \frac{V_{B1} - V_{C1}}{L_1} (1-D)T \quad (6)$$

在电感 L_2 给电池 B_2 充电的过程中，此时电感 L_2 上的电流 I_{L2} 线性减少，因此得到关系式：

$$L_2 \frac{dI_{L2}}{dt} = -V_{B2} \quad (7)$$

可以得到电流 I_{L2} 的减少量为：

$$\Delta I_{L2-} = \frac{V_{B2}}{L_2} (1-D)T \quad (8)$$

在一个开关周期中，电流 I_{L1} 和电流 I_{L2} 的增加量和减少量是一样的，由以上公式可以推到：

$$\begin{aligned} V_{B1}D + (V_{B1} - V_{C1})(1-D) &= 0 \\ (V_{C1} - V_{B2})D - V_{B2}(1-D) &= 0 \end{aligned} \quad (9)$$

通过计算消去 V_{C1} 得到了 V_{B1} 和 V_{B2} 的关系，得：

$$\frac{V_{B1}}{V_{B2}} = \frac{1-D}{D} \quad (10)$$

根据这种分析方法同样可以得到 $V_{B2} > V_{B1}$ 的情况。

2.2.2. 组间均衡电路

以4节电池为例来分析组间中单向反激式电路的均衡工作原理。在进行完组内均衡后,这时 $V_{B1} = V_{B2}$, $V_{B3} = V_{B4}$ 。测量并比较两个模组中电池电压之和是否相等,如果不相等则需要进行组间均衡。

反激式变换器由开关管 M 、变压器 T 、输出滤波电容 C 以及整流二极管组成。变压器 T 有两个绕组,分别为原边绕组和副边绕组。如图3所示,锂电池组接到反激式变压器的原边来给低电量的模组进行充电。当模组1中的总电量大于模组2中的总电量,控制 M_2 的占空比来给模块2进行充电。因为原边和两个副边的匝数比是相同的,所以流过电池 B_3 和 B_4 的电流一样大,可以同时充好电并停止均衡。反激式变换器的工作模式分为连续电流模式(CCM)和断续电流模式(DCM)。断续电流模式在工作的时候,副边产生的峰值电流大约为连续电流模式电流的2~3倍,对负载电流变化响应速度更快并且系统更加稳定。因此,这里反激式变换器工作在DCM模式,在这一段时间内变压器原边电流的增加量为:

$$\Delta I_1 = \frac{U_i DT}{L_1} \quad (11)$$

变压器二次侧的增量为:

$$\Delta I_2 = \frac{U_o(1-D)T}{L_2} \quad (12)$$

变压器二次侧开始给电池组充电时,二次侧电流由最大值线性下降到最小值,即:

$$I_{2\min} = I_{2\max} - \frac{U_o(1-D)T}{L_2} \quad (13)$$

由于工作在DCM状态,那么需满足:

$$I_{2\max} - \frac{U_o(1-D)T}{L_2} = 0 \quad (14)$$

一次侧电流最大值为:

$$I_{2\max} = \frac{U_i}{L_1} dt \quad (15)$$

由变压器两边特性可知,变压器的二次侧电流最大值为:

$$I_{2\max} = k_T \frac{U_i}{L_1} DT \quad (16)$$

$$k_T = \frac{N_1}{N_2} \quad (17)$$

综合以上公式可以得到:

$$k_T \frac{U_i}{L_1} DT - \frac{U_o}{L_2} (1-D)T = 0 \quad (18)$$

$$t_2 = \frac{DT(k_T U_i - U_o)}{U_o} \quad (19)$$

由于要保证变压器二次侧电流在周期内下降到0,那么:

$$t_2 \leq T \quad (20)$$

那么最终就可以得到:

$$D \leq \frac{U_o}{k_T U_i - U_o} \quad (21)$$

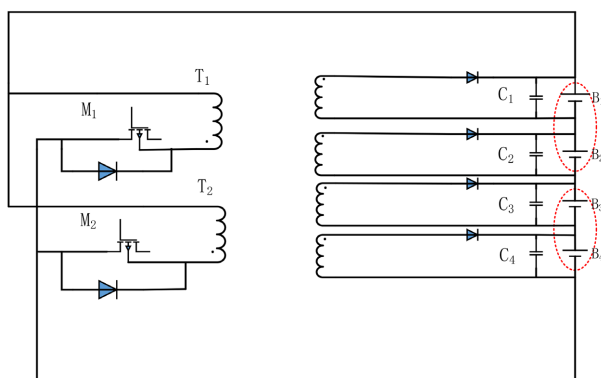


Figure 3. Intergroup equalization circuit
图 3. 组间均衡电路

3. 均衡电路控制策略

在一个电池组中，由于电池之间的内阻、容量等差异，会导致电池之间的电流和电压不均衡，从而影响电池组的性能和寿命。因此，需要对电池间的电流和电压进行均衡控制，以达到均衡分配负载、延长电池寿命、提高电池组性能等目的。电池间电流和电压的控制离不开均衡控制策略。本文采用工作电压作为均衡变量，组内组间都采用开环控制，下文对组内以及组间的控制策略进行介绍。

3.1. 组内均衡电路控制策略

首先进行组内均衡，其中组内均衡控制策略流程图如图 4 所示。

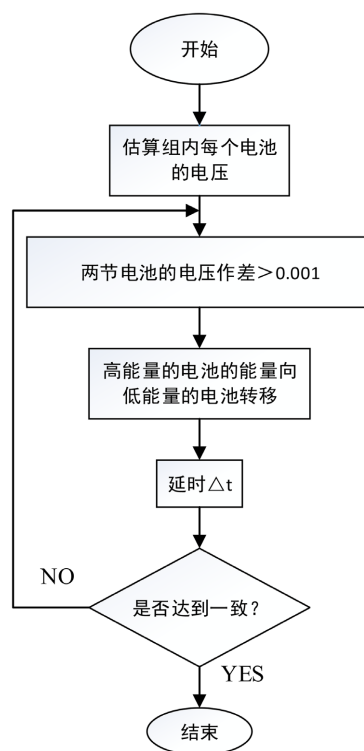


Figure 4. Flow chart of intra-group balanced control strategy
图 4. 组内均衡控制策略流程图

图5为组内均衡控制策略图,采用开环控制策略,控制Cuk变换器将高电压电池的能量转移到低电压电池。这个控制策略通过把组内的两节电池作差,看看是否符合均衡条件,这里设置阈值为0.001,即当组内两个电池的差大于0.001时才会进行均衡工作。假设 $V_{B1} > V_{B2}$,并且差超过阈值0.001,那么设置好的信号波输出给PWM1,占空比为0.5,这个时候电池 B_1 给电池 B_2 充电,反之一样。

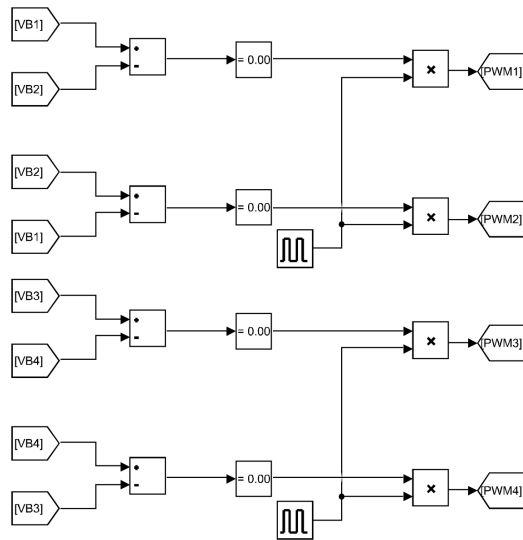


Figure 5. Intra-group balancing control strategy
图5. 组内均衡控制策略图

3.2. 组间均衡电路控制策略

当进行完组内均衡之后则要进行组间均衡,组间均衡控制策略流程图如图6所示。

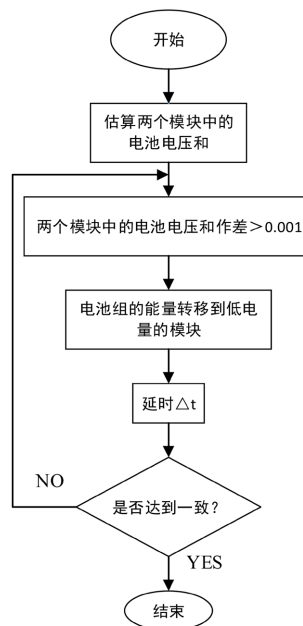


Figure 6. Flow chart of intergroup balanced control strategy
图6. 组间均衡控制策略流程图

图 7 为组间均衡控制策略图, 采用开环控制策略。这个控制策略通过测量两个模块中的电池电压之和, 然后把两个模块中的电压和进行比较作差, 看看是否符合均衡条件, 这里设置均衡阈值为 0.001, 即只有当两个模块中电池的电压和的差大于等于 0.001, 才会进行模块间电池电压的均衡。如果符合均衡条件, 则打开和控制电压低的电池模块电路中的开关管, 为了使反激式变换器工作在 DCM 模式, 所以要保证变压器二次侧电流在周期内下降到 0, 根据前文所推算到的公式这里设置占空比 D 为 0.5, 对低电压电池模块进行充电, 直到两个模块中电池电压之和的差值低于均衡阈值, 那么模组间的电池均衡结束。

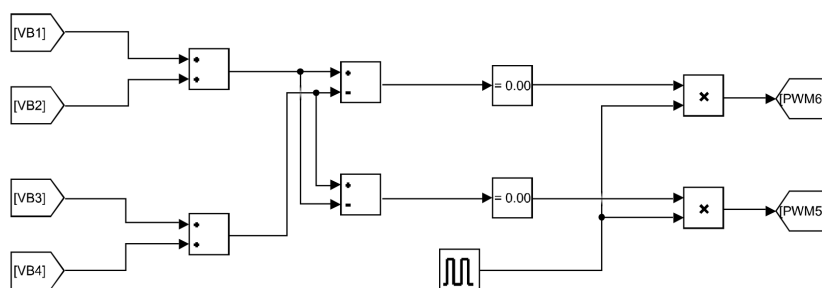


Figure 7. Intergroup balance control strategy

图 7. 组间均衡控制策略图

4. 仿真实验和分析

根据现有的均衡拓扑和控制策略, 以 4 节锂电池为例, 在 Matlab/Simulink 中搭建仿真模型来验证均衡方案可行性。均衡电路仿真模型图如图 8 所示。

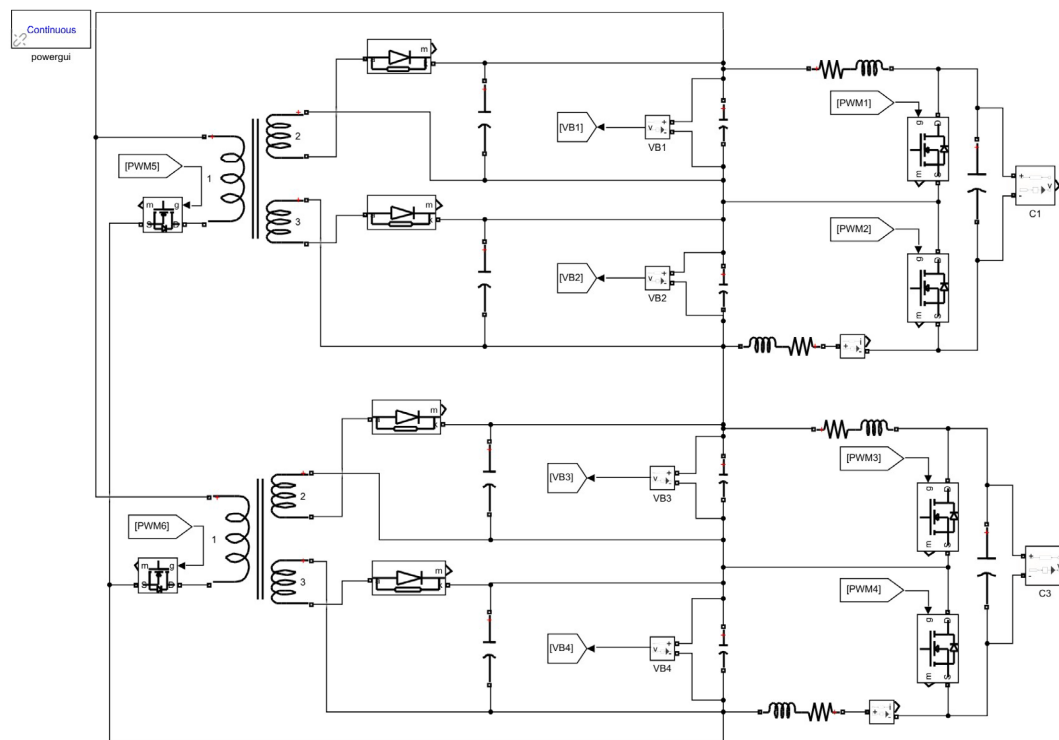


Figure 8. Equilibrium circuit simulation model

图 8. 均衡电路仿真模型图

4.1. 仿真参数设置

Cuk 电路模块中电感的值为 $50 \mu\text{H}$ ，电容的值为 $200 \mu\text{F}$ ，开关管的占空比根据不同的情况去设定。反激式变换器模块中变压器的励磁电感 L_m 为 5 mH ，原边和副边的匝数比为 $3:1$ ，频率为 10 kHz ，开关管中占空比 D 设置为 50% 。

4.2. 仿真结果分析

以 4 节锂电池来进行实验，把电池分成两个模块，每个模块中有 2 节锂电池。此均衡电路均衡过程分为两个阶段：首先进行组内单体电池均衡，最后进行组间模块间的均衡。图 9 为组内双向 Cuk 电路仿真结果。

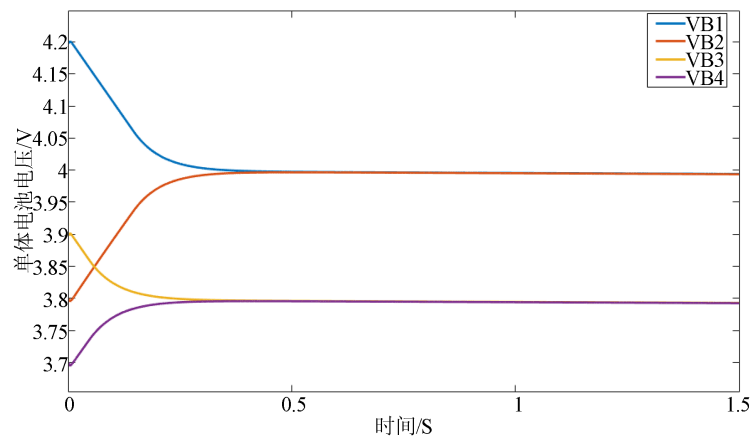


Figure 9. Simulation results of intra-group equilibrium
图 9. 组内均衡仿真结果

由图可知，在大约 0.5 s 完成了均衡。

图 10 为组间均衡仿真结果，由图可以看出 4 节锂电池在 0.3 s 到 0.4 s 之间就达到了均衡。图 11 为传统 Cuk 电路均衡仿真结果，可以看出 4 节锂电池在约 1.2 s 时才达到均衡。两者在均衡效率差不多的情况下，很显然本文所提出的均衡方案均衡速度更快，大大地提高了锂电池的使用效率。

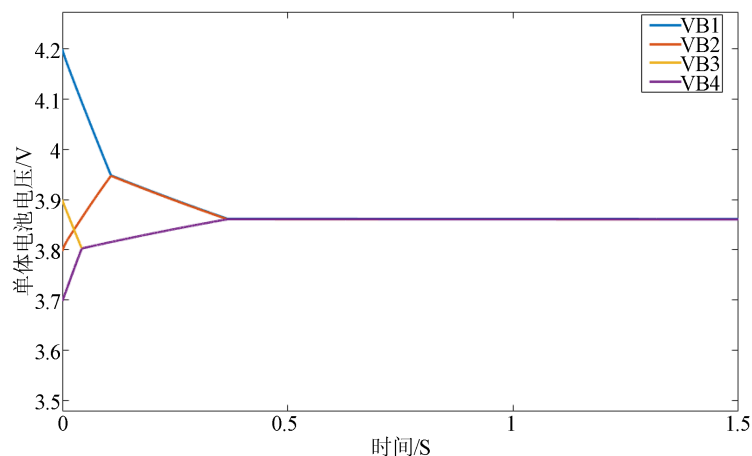


Figure 10. Simulation results of intergroup equilibrium
图 10. 组间均衡仿真结果

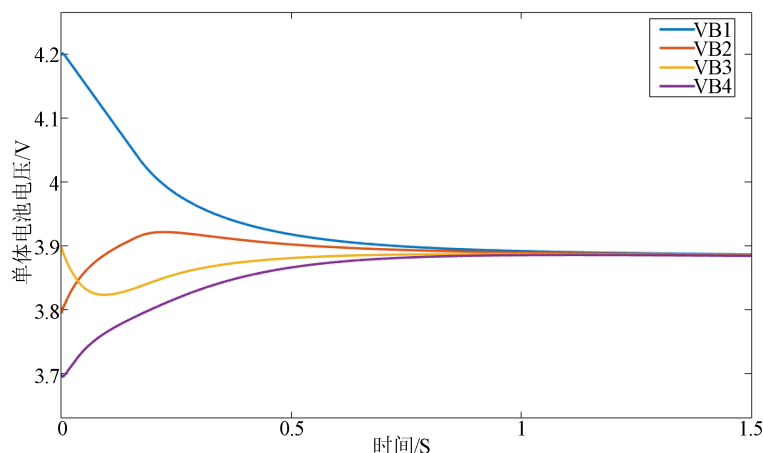


Figure 11. Traditional bidirectional Cuk simulation results

图 11. 传统双向 Cuk 仿真结果

5. 结论

针对锂电池组在使用过程中单体电池的不一致性问题,提出了一种把双向 Cuk 变换器和反激式变换器组合起来的动力电池组分组式均衡方案,该方案控制简单,均衡速度更快。详细地对各个阶段的电路的工作原理进行了分析并分别制定了相应的均衡策略。以 4 节锂电池为例,通过搭建 Matlab/Simulink 仿真模型。仿真结果表明:与传统双向 Cuk 均衡电路的均衡速度相比,本文所提出的方案均衡速度更快,验证了均衡电路和均衡策略的可行性。

参考文献

- [1] 李武华,徐驰,禹红斌,等. 直流微网系统中混合储能分频协调控制策略[J]. 电工技术学报, 2016, 31(14): 84-92.
- [2] 曹翊,王永刚,王青,等. 水系钠离子电池的现状 & 展望[J]. 储能科学与技术, 2016, 5(3): 317-323.
- [3] 郭向伟,耿佳豪,卜旭辉,等. 基于反激变换器的串联电池新型均衡方法研究[J]. 储能技术与科学, 2020, 9(3): 979-985.
- [4] 李勇,王丽芳,廖承林,等. 基于子空间技术的电动汽车电池模型辨识研究[J]. 电工电能新技术, 2015, 34(1): 1-6.
- [5] Cui, X.D., Shen, W.X., Zhang, Y.L., et al. (2017) Novel Active LiFePO₄ Battery Balancing Method Based on Chargeable and Dischargeable Capacity. *Computers & Chemical Engineering*, **97**, 27-35. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2016.11.014>
- [6] Liu, J., Chen, Y. and Fathy, H.K. (2017) Nonlinear Model-Predictive Optimal Control of an Active Cell-to-Cell Lithium-Ion Battery Pack Balancing Circuit. *IFAC*, **50**, 14483-14488. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.2297>
- [7] 颜靖华. 分布式蓄电池监测系统中电压均衡技术研究[J]. 电源技术, 2015, 139(5): 975-976.
- [8] 刘红锐,夏超英. 一种新型的电动车用电池均衡方法探讨[J]. 汽车工程, 2013, 35(10): 934-938.
- [9] 王通. 基于多输入绕组变压器的动力电池双层主动均衡电路研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2017.
- [10] 华昀,周思达,何榕,等. 车用锂离子动力电池组均衡管理系统研究进展[J]. 机械工程学报, 2019, 55(20): 73-84.
- [11] 李志扬,陈雨飞,吕帅帅,等. 锂电池组均衡方式的研究现状[J]. 电源技术, 2018, 42(9): 1404-1407.
- [12] Rose, J.L. and Sankaragomathi, B. (2018) Comparison of Buck-Boost and Cuk Converters Based on Time Domain Response. *Journal of Circuits, Systems and Computers*, **27**, 24-47. <https://doi.org/10.1142/S0218126618502225>
- [13] 甘正飞. 动力电池组分组式均衡方案的研究与设计[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2015: 28-29.
- [14] 翟二宁,滑娟,崔晓宇,等. 动力电池组主动均衡系统设计与实现[J]. 电源技术, 2020, 44(2): 249-252.
- [15] 叶凌云,朱幸,黄添添,等. 变压器分立的动力电池组主动均衡技术研究[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(7): 83-91.